

# **Alteración hidrotermal en yacimientos epitermales desarrollada en rocas básicas**

---

(Macizo del Deseado, Argentina)

Trabajo fin de grado

SERGIO MEDRANO BIRIJALBO

Curso 2015/2016

Directores

Dr. Blanca Bauluz Lázaro

Dr. Ignacio Subías Pérez

# Índice

|  |    |
|--|----|
| Abstract .....   | 1  |
| 1. Introducción .....  | 2  |
| 2. Objetivos .....   | 2  |
| 3. Mina Martha: Geología regional y local .....                          | 3  |
| 3.1. Contexto geológico .....  | 3  |
| 3.2. Yacimientos minerales .....   | 6  |
| 3.3. Mina Martha .....   | 6  |
| 4. Metodología .....   | 7  |
| 4.1. Visu .....  | 8  |
| 4.2. Microscopia óptica (luz transmitida).....                           | 8  |
| 4.3. Difracción de rayos - X (DRX).....                                  | 8  |
| 4.4. Microscopia Electrónica de Barrido de emisión de campo (FESEM)..... | 9  |
| 5. Resultados .....  | 10 |
| 5.1. Resultados microscopia óptica (luz transmitida) .....               | 10 |
| 5.2. Resultados difracción de rayos - X (DRX) .....                      | 13 |
| 5.3. FESEM.....  | 15 |
| 5.3.1. Plagioclasa .....   | 15 |
| 5.3.2. Piroxeno .....  | 16 |
| 5.3.3. Clorita .....   | 16 |
| 5.3.4. Titanita .....  | 17 |
| 5.3.5. Caolinita .....   | 18 |
| 5.3.6. Interestratificados I/S.....                                      | 18 |
| 5.3.7. Ilita.....  | 19 |
| 6. Discusión .....   | 20 |
| 7. Conclusions .....   | 22 |
| Agradecimientos .....  | 22 |
| Bibliografía .....   | 22 |

## Abstract

The aim of work is to establish the mineralogical characterization and architecture of the hydrothermal alteration associated to the Josefa vein. This vein belongs to the Martha Este vein system, which is the richer vein system in silver of the low sulfidation epithermal Martha deposit. This deposit is located at the Macizo del Deseado, provincial de Santa Cruz, in the Argentinean Patagonia.

The Martha deposit is hosted by the andesites of the Formación Bajo Pobre, belonging to Complejo Bahía Laura. This volcanoclastic succession represents a volcanic episode related to an extensional back-arc regime, which took place during middle Jurassic times.

To achieve the aforementioned aim, various techniques and methodologies (visu description, XRD, transmitted light microscopy and field emission scanning electron microscopy) have been combined to establish the following processes and areas:

From the obtained results, we have concluded the following:

- The existence of an early silicic hydrothermal alteration occupying the proximal zone to the vein. Quartz is replacing andesite phenocrysts (plagioclase, pyroxene, apatite and sphene) and matrix. Rare amounts of smectite and kaolinite are also present. The mineral association informs us that this hydrothermal alteration was promoted by acid fluids at temperatures ca. 250-300°C. Fluid rock interaction was responsible for relative cooling neutralization which provoked phyllosilicates precipitation.
- Distally from the vein a selective alteration association made by chlorite, kaolinite, illite-smectite (I/S) interstratifications and smectite is found. The pyroxene and plagioclase phenocrysts are partially replaced by chlorite, while kaolinite, (I/S) and smectite are replacing the matrix. As we move away from the vein, kaolinite disappears and replacement becomes weaker. In other words, an evolution from advanced argillic to argillic alteration has been identified. This argillic alteration was generated by fluids with nearly neutral pH than the previous zone and temperatures 200-250°C
- A late alteration process originated calcite superposition over silicification and argillitization.
- Taking into account that low sulfidation epithermal deposits are located in the less altered host rock, the potential zones in our study area would be those marked by argillic alteration. This point confirms the use of hydrothermal alteration studies as an exploration tool.

## 1. Introducción

La provincia geológica del Macizo del Deseado (Feruglio, 1949) se encuentra situada en el sur de la Patagonia austral argentina, dentro de la provincia de Santa Cruz. Este macizo se caracteriza por la presencia de una gran cantidad de mineralizaciones epitermales, principalmente de oro y plata, por lo que se le atribuye el nombre de Provincia Auroargentífera del Deseado (Schalamuk et al., 1999). Estas mineralizaciones están relacionadas genética, espacial y temporalmente con un magmatismo bimodal jurásico (Guido y Schalamuk, 2003), cuya génesis y estilo de emplazamiento es actualmente objeto de estudio y debate.

El altísimo potencial no sólo económico sino científico de esta región estuvo marcado por el hallazgo de las mineralizaciones auríferas del yacimiento Cerro Vanguardia (Genini, 1977). Desde entonces esta región ha sido objeto de numerosos estudios tanto geológicos como metalogenéticos, lo que ha provocado el descubrimiento de decenas de yacimientos epitermales con altos contenidos en oro y plata. Como consecuencia, en esta zona se concentran una gran cantidad de minas, muchas de ellas *world class*, como Cerro Vanguardia, Martha, San José y Manantial Espejo (Fernández et al., 2008). Pese a todo esto existen sectores del Macizo del Deseado que no han sido aun debidamente estudiados, siendo uno de estos, el sector suroccidental. Son precisamente las alteraciones hidrotermales ligadas a la mina Martha situada en el sector mencionado el objeto de este trabajo.

Los yacimientos epitermales de oro y plata llevan asociados unas alteraciones hidrotermales en las rocas de caja, que siguen unos patrones definidos, como consecuencia de la intensa circulación de fluidos que se extienden tanto lateral como verticalmente, produciendo modificaciones mineralógicas y texturales muy significativas. Esto convierte a dichas alteraciones en metalotectos; en otras palabras, en guías o criterios de exploración que pueden utilizarse para la localización de este tipo de depósitos minerales.

## 2. Objetivos

El objetivo de este trabajo es caracterizar la alteración hidrotermal y establecer zonas de alteración en las rocas andesíticas, en las que encaja la veta Josefa, perteneciente al sistema filoniano que constituye Mina Martha. Este tipo de trabajo tiene interés por la utilización de los minerales de alteración hidrotermal como guías de exploración.

Otro objetivo adicional, y no menos importante, es aprender a utilizar metodologías específicas, presentar los resultados obtenidos durante una investigación e integrarlos en el contexto genético de la zona.

Para conseguir estos objetivos se han realizado las siguientes actividades:

- Revisión bibliográfica relacionada con la geología de la zona y relativa a alteraciones hidrotermales.
- Caracterización de visu y microscopia óptica de la textura y mineralogía de las rocas alteradas.
- Caracterización, por microscopia electrónica de barrido, de la textura de la roca y composición química de las fases minerales.
- Análisis de los datos.

### 3. Mina Martha: Geología regional y local

#### 3.1. Contexto geológico

La zona minera de estudio en cuestión, está situada en el Sur de la Patagonia Argentina, en la parte Suroccidental de la provincia de Santa Cruz, en el Macizo del Deseado, el cual abarca una superficie total de unos 60.000Km<sup>2</sup> (Schalamuk et al., 1999). Este macizo se encuentra tanto al norte como al sur limitado por dos grandes ríos, el río Deseado, que los separa de la cuenca del Golfo de San Jorge, y el río Chico, límite con la cuenca Austral, respectivamente. Al este, se encuentra limitado por el Océano Atlántico y al oeste por la Cordillera de la Patagonia Austral (Figura 1).

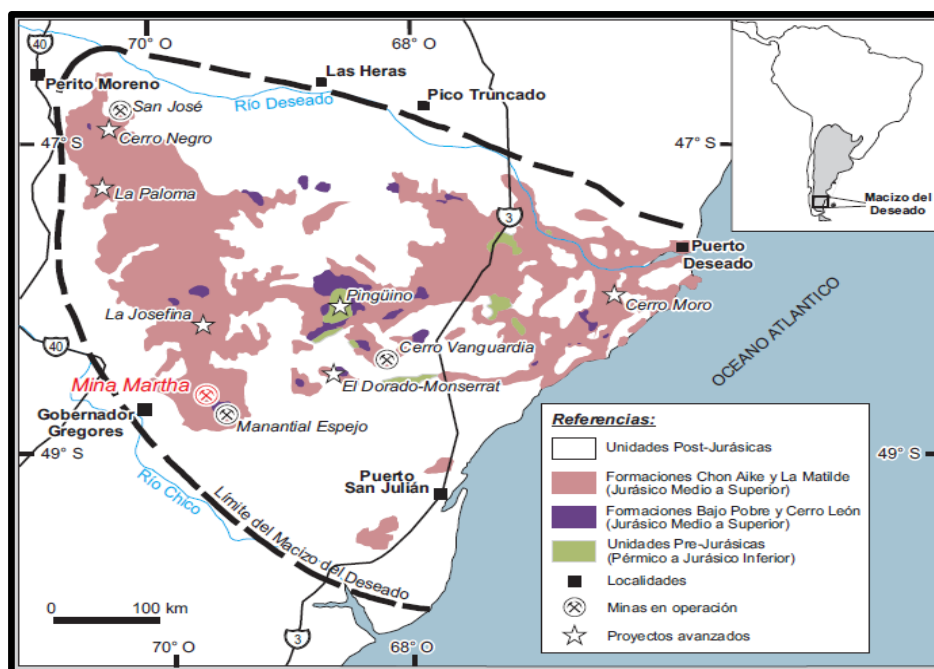


Figura 1: Mapa del Macizo del Deseado, donde se resaltan sus límites geográficos, la situación de la mina Martha, así como las principales formaciones en las que encajan los yacimientos epitermales (Páez, 2012).

Los materiales más antiguos del Macizo del Deseado, que corresponden al basamento, y pertenecen al Complejo Río Deseado, se encuentran de forma dispersa y aislada. En el sector oriental estos materiales están caracterizados por rocas metamórficas de medio a alto grado, de edad Neoproterozoica a Cámbrica. Posteriormente estos materiales fueron intruidos por granitoides desde el Cámbrico al Ordovícico (Guido et al, 2004).

Por su parte, el sector occidental se caracteriza por la presencia de rocas volcanoclásticas, afectadas por un bajo grado de metamorfismo, facies esquistos verdes. Estos materiales corresponden a la Fm. La Modesta, de edad Silúrica a Devónica, aunque podrían ser más antiguas ya que los estudios geocronológicos realizados dan una edad indeterminada entre la sedimentación y el metamorfismo (Moreira et al., 2005).

Sobre los materiales anteriores encontramos de forma discordante materiales continentales epiclásticos, de edad permotriásica, los cuales corresponden al Grupo Tres Cerros y al Grupo El tranquilo (en color verde en la Figura 1). Estos materiales fueron depositados en cuencas extensionales con orientación NO-SE, encontrándolos

Alteración hidrotermal en yacimientos epitermales desarrollada en rocas básicas (Macizo del Deseado, Argentina).

principalmente en la zona centro-oriental del Macizo (Guido et al., 2004). A finales del Triásico, durante la etapa extensional, se produce un magmatismo asociado que se mantendrá hasta finales del Jurásico, de esta forma los materiales de los Grupos Tres Cerros y El Tranquilo se vieron intruidos por diques graníticos de afinad calcoalcalina (Pankhurst et al., 1993) correspondientes a la Fm. La Leona. En el sector central y de forma prácticamente sincrónica, se produce el depósito de una secuencia epi-piroclástica de ambiente fluvial, correspondiente a la Fm. Roca Blanca (Panza, 2002; De Barrio et al., 1999).

Durante el Jurásico medio y superior, la actividad magmática va en aumento y se produce un gran evento volcánico que da origen a la Provincia Ígnea Gigante Chon Aike (Pankhurst et al., 1998) como se puede ver en la figura 2.

Esto se manifiesta en los materiales volcánicos bimodales que forman el Complejo Bahía Laura (Guido et al., 2006; Ruiz et al., 2008) y que se disponen de forma discordante sobre los anteriores en la parte central del Macizo del Deseado, disminuyendo su presencia hacia la periferia. Este complejo se ve integrado a su vez por las Formaciones Bajo Pobre, Cerro de León, Chon Aike y La Matilde.

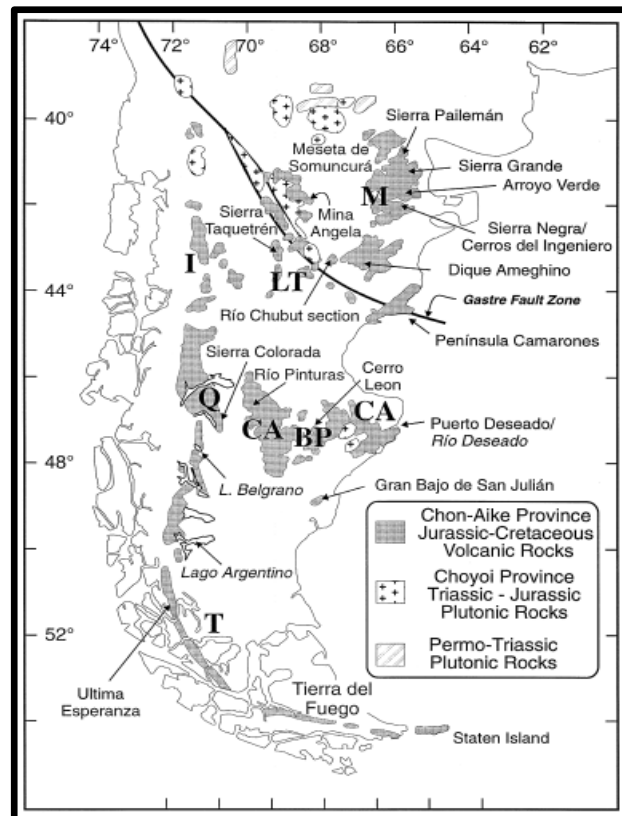


Figura 2: Mapa de distribución de los materiales de la provincia de Chon Aike (Pankhurst et al., 1998).

La Formación Bajo Pobre representa los materiales inferiores del Complejo Bahía Laura, está formada por materiales volcánicos de carácter básico a intermedio de afinidad calcoalcalina, principalmente andesitas, aunque también encontramos basaltos, dacitas y aglomerados volcánicos (Panza, 2002), los cuales se depositaron durante el Jurásico medio, aflorando de forma constante en el sector central y de forma dispersa en la periferia. En esta formación es donde se encuentran los materiales que se pretenden caracterizar a lo largo de este trabajo. La Formación Cerro León está formada por materiales equivalentes a los de la

Alteración hidrotermal en yacimientos epitermales desarrollada en rocas básicas (Macizo del Deseado, Argentina).

Fm. Bajo Pobre por lo que puede establecerse una correlación con la misma (De Barrio et al., 1999). La Fm. Chon Aike, representa la parte media del Complejo Bahía Laura y está constituida por ignimbritas y riolitas principalmente, además de material piroclástico, todo eso de naturaleza calcoalcalina. La Fm. La Matilde, corresponde a los materiales superiores del Complejo Bahía Laura y está formada por una secuencia de materiales tobaceos de caída y depósitos volcanoclásticos entre los que se intercalan niveles de ignimbritas, todo ello de naturaleza calcoalcalina de tipo peraluminico (Guido, 2004).

El origen de los magmas de este complejo no está del todo claro. Algunos autores afirman que las formaciones Bajo Pobre y Chon Aike poseen relaciones idénticas de isotópicas  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  y  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  y que, por lo tanto, parten de la una misma fuente isotópica (Pankhurst et al. 1998), mientras que otros autores como Páez (2012) basándose en modelizaciones petrogenéticas y estudios de inclusiones fundidas aseguran una fuente distinta entre los magmas ácidos y los intermedios.

Posteriormente desde el límite del Jurásico superior hasta el Cretácico inferior se produce el depósito de una secuencia volcanoclástica y sedimentaria debido a la reactivación del régimen extensional de la zona, acumulándose los materiales en pequeñas cuencas cerradas, dando lugar a la Formación Bajo Grande, arenas y tufitas principalmente, y a la Formación Baqueró, tobas, cenizas y arenas, respectivamente (Di Persia, 1958; Archangelsky y Cuneo, 1984). El Cretácico medio está representado por sedimentos continentales pertenecientes al Grupo del Chubut, (Lesta, 1969). Por último los materiales correspondientes al Cretácico superior se corresponden con la Formación Las Mercedes, la cual aflora principalmente en la zona central y se compone de basaltos olivínicos, marcando así el comienzo de una etapa efusiva basáltica que se mantendrá hasta el Holoceno. Esta etapa efusiva se cree que es debida a la migración de una ventana astenosférica, de dirección SW-NE, generada por la subducción del punto triple de las placas Antártica, Nazca y Sudamericana (Ramos y Kay, 1992).

Sobre los materiales anteriores y de forma discordante, durante el Oligoceno inferior se deposita la Formación Sarmiento (Palma, 1989), la cual corresponde a materiales continentales formados por tobas y areniscas. Por encima de estos materiales aparecen la Formación Monte de León y la Formación San Julián (Zambrano y Urien, 1970), correspondiendo a materiales marinos pelíticos y areniscosos del Oligoceno superior y que son producto de una transgresiones marinas desde el Atlántico. Sobre estos encontramos la Formación Santa Cruz que correspondiendo a materiales continentales. Todos estos materiales son cubiertos finalmente por materiales basálticos procedentes de un nuevo proceso efusivo durante el Plioceno (Kay et al., 1989).

Desde el punto de vista estructural y tectónico, el comportamiento del Macizo del Deseado no está muy claro, ya que algunos autores afirman que el macizo se comporta de una forma rígida y sin deformación marcado por la subsidencia de la zona norte y sudeste (Panza, 1995). Otros autores como Homovc y Constantini (2001) sugieren una gran subsidencia resumida en dos ciclos de relleno sedimentario y volcanoclástico desde el Pérmico al Terciario y que emerge durante el Cretácico. Desde el punto de vista paleogeográfico sí que parece estar claro que la evolución de dicho macizo está relacionada con varios procesos de ruptura y acreción de la parte sudoccidental de Gondwana que culminó con la apertura del océano Atlántico y la separación completa de las placas Sudamericana y Africana a finales del Jurásico y principios del Cretácico (Ramos, 2008).

### 3.2. Yacimientos minerales

Como se ha mencionado anteriormente, la región del Macizo del Deseado presenta una gran cantidad de mineralizaciones, principalmente de oro y plata, de las que las minas Cerro Vanguardia, Martha, San José y Manantial Espejo, están activas actualmente. Las mineralizaciones son, en la mayoría de los casos, epitermales de baja sulfidación (LS), dispuestas mayoritariamente en vetas y, en ocasiones, en brechas, de cuarzo y calcedonia, *stockworks* y diseminaciones controladas estructuralmente con orientación NO.

Las rocas encajantes de estas vetas son las andesitas de la Formación Bajo Pobre y las ignimbritas de la Formación Chon Aike. En este estudio las rocas caja pertenecen a la Formación Bajo Pobre. El relleno y formación de estas vetas se debe a los múltiples episodios extensionales que se dieron a partir del Jurásico en la zona.

El contacto veta-roca de caja es en la mayoría de los casos neto, dando lugar a diferentes tipos de alteración hidrotermal en dicha roca, como puede ser silicificación, argilitización, seritización y propilitización (Schalamuk et al., 1999).

### 3.3. Mina Martha

El yacimiento argentífero Mina Martha, se encuentra en la parte sudoccidental del Macizo del Deseado, a unos 70 kilómetros de la localidad Gobernador Gregores. Dicho yacimiento pertenece a la empresa Coeur d'Alene Mines Corporation desde el 2001.

Mina Martha es un yacimiento de plata principalmente, con oro y metales base, formado por una amplia red de filones (Figura 3) de cuarzo-adularia encajados en los materiales de la Fm. Chon Aike y Bajo Pobre. Las mineralizaciones han sido formadas por múltiples episodios de relleno y brechificación dando una relación de Ag:Au que oscila entre 900-100:1 con una zona de alteración hidrotermal restringida (Páez, 2012).

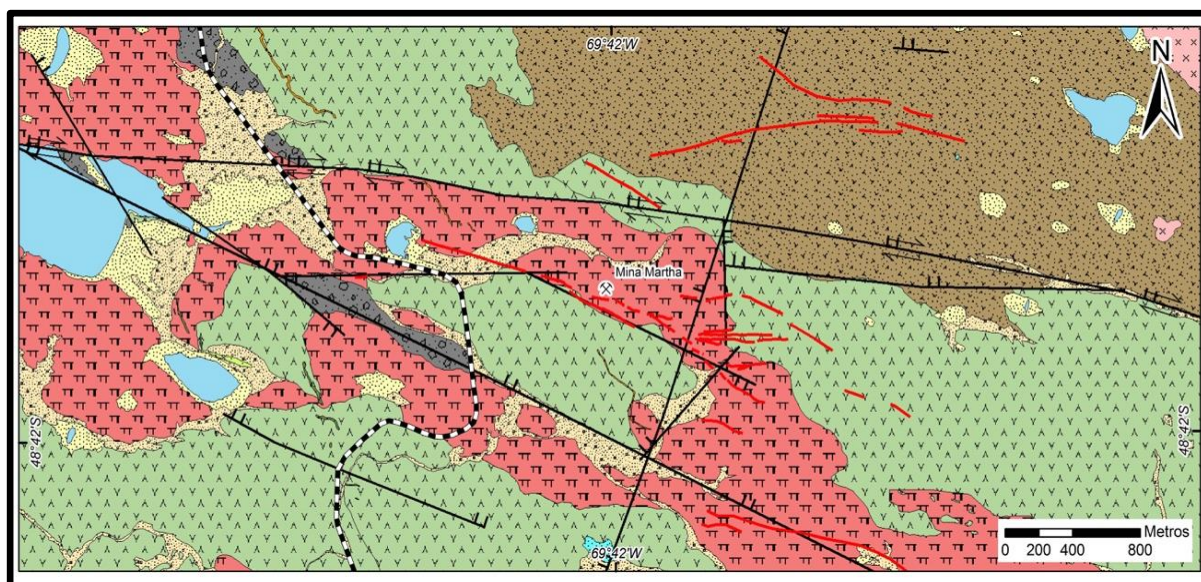


Figura 3: Mapa geológico de Mina Martha (Páez, 2012).

La amplia red de vetas presentes en las inmediaciones a Mina Martha pueden ser divididas en tres sistemas en función de su orientación general, un primer sistema de orientación NO-SE formado por las vetas Martha, R4, Martha Oeste, Martha Este y Martha Sur, que se denomina Sistema Martha-R4. Un segundo sistema de orientación E-O formado por las vetas Belén, Francisca, Catalina, Nordeste, R4A y Futuro, denominadas Sistema del



Alteración hidrotermal en yacimientos epitermales desarrollada en rocas básicas (Macizo del Deseado, Argentina).

Medio y el ultimo sistema de orientación NO-SE formado por las vetas Isabel e Isabel Oeste, denominado Sistema Isabel (Páez, 2012).

Las muestras que se analizan en este trabajo pertenecen a la veta Josefa, que es una veta que forma parte la veta principal Martha Este (Figura 4), encajada sobre materiales de la Fm. Bajo Pobre. Teniendo esto en cuenta nos encontramos en el Sistema Martha-R4, el cual está compuesto por una única estructura de orientación NO-SE que buza hacia el SO, dividida a su vez en varios segmentos donde los más importantes corresponden a las Vetas Martha y R4, los cuales dan nombre del sistema.

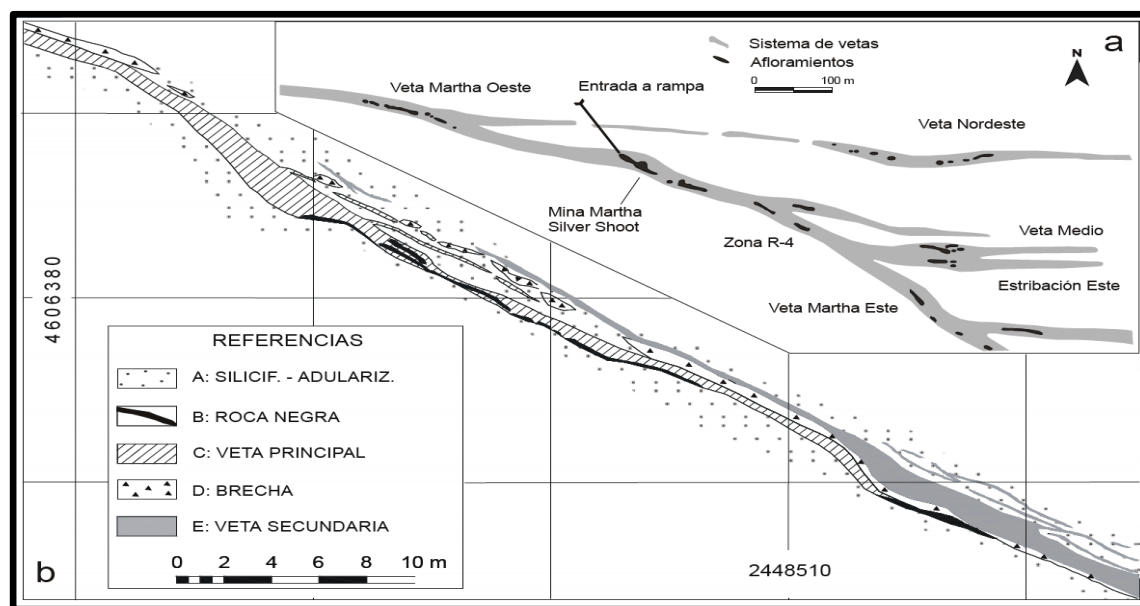


Figura 4: Disposición de las principales vetas de Mina Martha, la veta Josefa forma parte de la Veta Martha Este (González-Guillot et al., 2004)

## 4. Metodología

Las muestras, que fueron suministradas para realizar este estudio, fueron tomadas en trincheras realizadas en la veta Josefa ( $112^{\circ}$ ,  $75^{\circ}$ N), (Figura 5), perteneciente a la zona Wendy (veta Martha Este), al sureste de la mina Martha. Se recogieron ocho muestras (AC09121, AC09124, AC09125, AC09126, AC09127, AC09128, AC09129 y AC09130) siendo esta última la más alejada del resto como se muestra en la figura 5. Las coordenadas UTM de las muestras se muestran en la Tabla 1.

| Muestra | UTM                 | Altura (m) |
|---------|---------------------|------------|
| AC09121 | 19 F 454156 4599344 | 336        |
| AC09124 | 19 F 454148 4599346 | 338        |
| AC09125 | 19 F 454150 4599343 | 340        |
| AC09126 | 19 F 454204 4599288 | 339        |
| AC09127 | 19 F 454183 4599323 | 337        |
| AC09128 | 19 F 454156 4599331 | 339        |
| AC09129 | 19 F 454191 4599292 | 342        |
| AC09130 | 19 F 454037 4599314 | 347        |

Tabla 1: Coordenadas de las muestras recogidas en la veta Josefa.

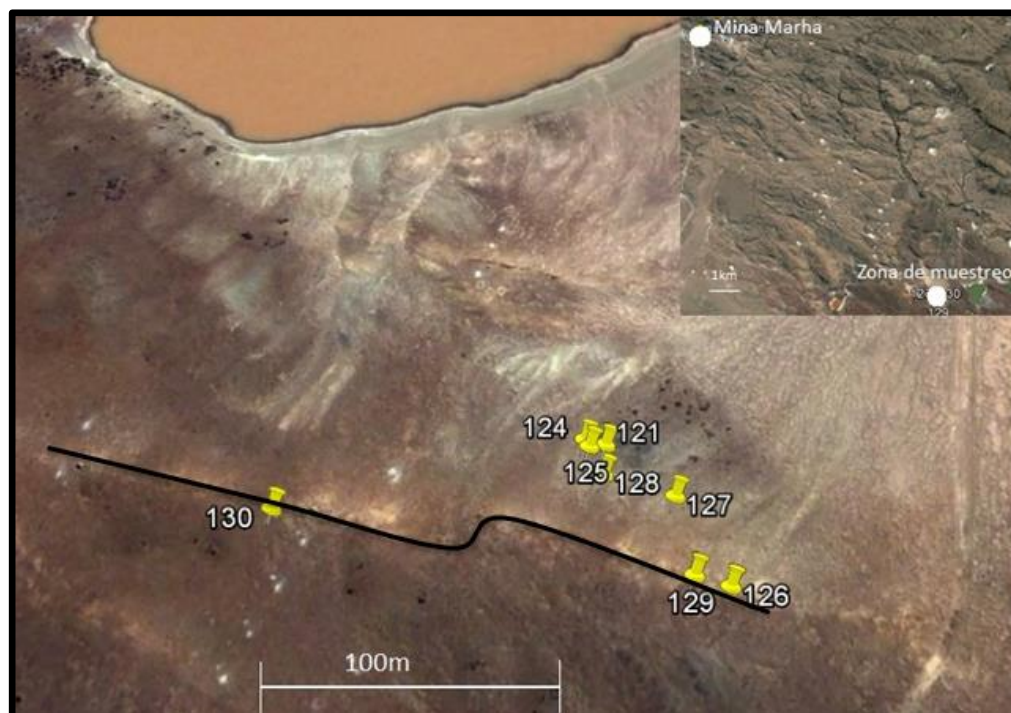


Figura 5: Mapa de situación de Mina Martha y de Veta Josefa (trazo de color negro) y localización de las muestras estudiadas. Imagen tomada de Google Earth.

#### 4.1. Visu

Se realizó una descripción de visu de las muestras para determinar de modo preliminar la mineralogía y textura de las muestras. Este estudio permitió además hacer una selección para la elaboración de láminas delgadas pulidas y el estudio por difracción de Rayos X (DRX).

#### 4.2. Microscopía óptica (luz transmitida)

El estudio por microscopía de luz transmitida se realizó para caracterizar las fases presentes en las rocas, la textura y la alteración que aparecen en cada muestra. Para ello se utilizó un microscopio de doble iluminación, Olympus BX-50, que lleva acoplado una cámara digital Olympus WZ7070 controlada con la aplicación Cam2Com, para obtener microfotografías de las muestras estudiadas.

#### 4.3. Difracción de rayos - X (DRX)

El objetivo de esta técnica es la identificación y determinación semicuantitativa de las distintas fases minerales que aparecen en cada muestra. Se hizo DRX (método del polvo cristalino) tanto en muestra total como en la fracción menor a  $20\mu$  para determinar las arcillas existentes. Con esta técnica se analizaron las muestras AC09121, AC09124, AC09125, AC09126 y AC09127 ya que las otras presentaban evidencias de procesos de silicificación intensos y, por lo tanto, su contenido en arcillas es prácticamente nulo.

Las muestras seleccionadas fueron trituradas con una machadora de mandíbulas, consiguiendo fragmentos de un tamaño aproximado de 1 cm. Se cuarteó cada muestra para obtener una parte alícuota para muestra total y otra para el estudio de las arcillas.

Para el análisis de muestra total, la muestra fue molida mediante un molino de ágata y una vez obtenido el polvo de cada muestra, se realizó una homogeneización de la muestra

con la ayuda de una espátula y un cuarteado con el fin de obtener unos pocos gramos de muestra representativa. A continuación, se pasó completamente cada muestra por un tamiz con una luz de malla de 53 $\mu$ m. Una vez tamizada, cada muestra es de nuevo cuarteada de forma manual, hasta conseguir una cantidad suficiente para rellenar el portamuestras de aluminio, al cual se le colocan dos cubres de vidrio y su siglado correspondiente. En este tipo de preparación la muestra en polvo está desorientada.

Una vez preparadas todas las muestras, se analizaron con un difractómetro Philips PW 1710, con radiación Cu-K $\alpha$ , rendija automática y monocromador de grafito, con un voltaje de 40kV y 30 mA de intensidad y un área de barrido entre 3 y 60 ° 2 $\theta$  con una velocidad de goniómetro de 0.1 °2 $\theta$ /seg, y tiempo de integración de 0.4 seg. El registro de los datos obtenidos se realizó con el Software Xpowder (Martín, 2007).

Tras identificar los minerales presentes mediante el uso de las tablas de difracción (Powder Diffraction File, JCODS, 1974), se utilizaron los poderes reflectantes de Schultz (1964) y Biscaye (1965) para la realización del estudio semicuantitativo.

Previamente al estudio de arcillas, las muestras que contenían carbonatos fueron atacadas con HCl 0,3N. Posteriormente, se lavaron con agua destilada hasta conseguir la neutralización del pH, lo que se comprobó mediante papel indicador de pH. Una vez libres de carbonatos, las muestras destinadas al estudio de arcilla se pusieron en agitación (10-15 minutos) con agua destilada para facilitar la dispersión. Pasado este tiempo, se tamizaron en húmedo, con un tamiz de luz de malla 20  $\mu$ m. Con estas suspensiones se elaboraron los agregados orientados. Para ello se deposita la suspensión con la ayuda de un pincel sobre un vidrio porta objetos consiguiendo que los minerales de la arcilla se orienten con los planos (001) paralelos al vidrio. Se dejaron secar a temperatura ambiente

Una vez preparado el agregado orientado, se analizó mediante difracción de rayos X, obteniéndose difractogramas de la fracción menor a 20 $\mu$ m de cada muestra. Las condiciones de trabajo fueron las mismas que las descritas en el caso de la muestra total con la salvedad del área de barrido, entre 3 y 30° 2 $\theta$ , en este caso.

El estudio de DRX se realizó sobre agregados orientados secados al aire y solvatados en etilenglicol en una estufa a 60°C durante 48h, con el fin de detectar la presencia de minerales de la arcilla expandibles. Se aplicaron los poderes reflectantes de Schultz (1964) y Biscaye (1965) para determinar su composición semicuantitativa.

#### 4.4. Microscopia Electrónica de Barrido de emisión de campo (FESEM)

Tras haber realizado el estudio de microscopía óptica y DRX, se seleccionaron 4 muestras (AC09121, AC09124, AC09127 y AC09130) en función de la mineralogía y las alteraciones hidrotermales para el estudio por FESEM. Con el fin de facilitar el trabajo en el FESEM, por microscopia de luz transmitida se seleccionaron y se tomaron fotografías de zonas de interés de cada lámina delgado pulida.

Los objetivos de esta técnica son: (1) la complementación de la caracterización petrográfica realizada mediante microscopia óptica, ya que en el FESEM se obtienen imágenes de mayor resolución. Además, estas imágenes dan información composicional ya que se utilizó la señal de electrones retrodispersados (BSE) y (2) la realización de análisis químicos puntuales para determinar la composición química de las fases minerales presentes. Previamente, las muestras se dejaron secar a 60°C en condiciones de vacío, a continuación se montan en un porta metálico de cobre, colocando la superficie a visualizar

en la parte superior y, por último, se recubren con carbono para hacerlas conductoras de los electrones.

Para este estudio se utilizó un microscopio Carl Zeiss MERLIN FESEM, equipado con un detector Oxford de Energía Dispersiva de Rayos X (EDS) usando un voltaje de 15kV, corriente de sonda de 400pA y tiempo de conteo de 60 segundos para realizar los análisis puntuales. El estudio se realizó en el Servicio de Microscopía Electrónica de Materiales del Servicio de Apoyo a la Investigación de la Universidad de Zaragoza.

## 5. Resultados

### 5.1. Resultados microscopía óptica (luz transmitida)

Tras el análisis de visu y microscopía óptica se han agrupado las muestras en cuatro grupos en función de la mineralogía y características texturales.

El primer grupo está formado por las muestras AC09121, AC09124, AC09125 y AC09126, en lo que al visu se refiere, todas las muestras presentan textura porfídica con fenocristales de feldespato que van desde tonos rosas a tonos verdosos, estos fenocristales son subidiomorfos con tamaños medio de 0.3 cm y máximo de 0.5 cm. También encontramos fenocristales de color blanquecino a grisáceo pudiendo tratarse de cuarzo, estos fenocristales son menos abundantes que los anteriores y presentan por lo general una morfología inequidimensional, alotriomorfa, con tamaño medio en torno a los 0.2 cm y tamaño máximo de 0.6 cm (Figura 6A).

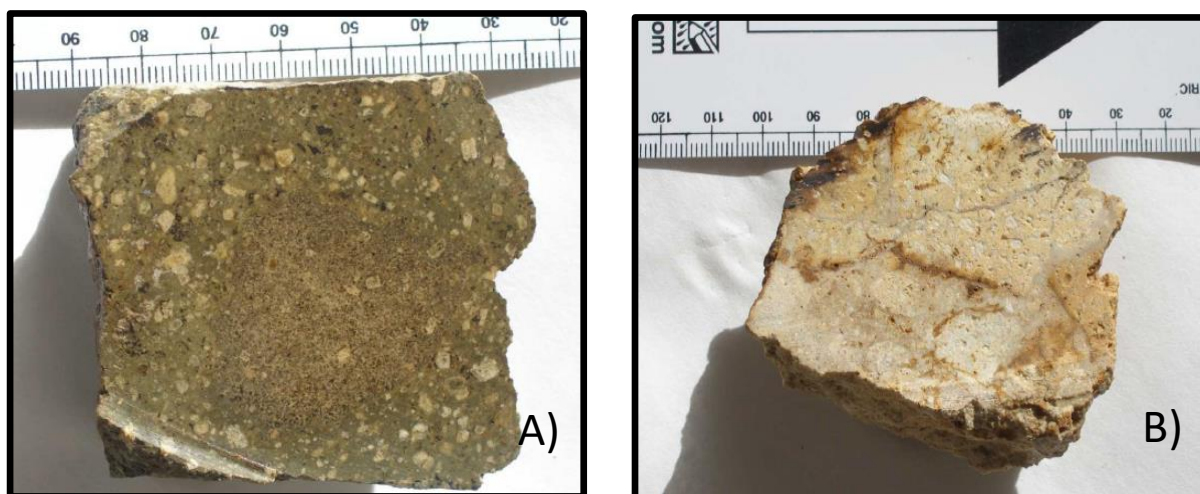


Figura 6: Muestras de mano, veta Josefa, A) muestra AC09124, B) muestra AC09127.

Respecto a la microscopía óptica, en todas las muestras se aprecia textura porfídica, con dos tamaño de fenocristales bien diferenciados, los más grandes, con tamaño medio de 0.2 cm se corresponden con plagioclasas, albitizadas, ya que en los fenocristales menos alterados se puede identificar maclas de carlsbad y alguna macla polisintética. Estos fenocristales son subidiomorfos a idiomorfos, zonados y en la mayoría de los casos están alterados a cloritas y calcita (Figura 7). Las cloritas, por lo general, reemplazan parcial o totalmente los fenocristales y, en ocasiones se observa que el núcleo está ocupado por carbonatos. Además de estos fenocristales se observan otros de tamaño similar de coloraciones verdosas, que presentan secciones octogonales, anisotropía baja (gris de primer orden) pudiendo tratarse de piroxenos, si bien el grado de alteración a cloritas y



Alteración hidrotermal en yacimientos epitermales desarrollada en rocas básicas (Macizo del Deseado, Argentina).

carbonatos dificulta una identificación más exacta y ocasionalmente aparecen fenocristales de cuarzo. También hay fragmentos de menor tamaño (tamaño medio inferior a 0.1 cm,) de circón, apatito, y esfena accesorios, posiblemente todos ellos sean de la roca original, por lo general son subidiomorfos y se presentan de forma excepcional y aislada. Por último cabe destacar la presencia de óxidos de hierro en todas las muestras. En cuanto a la matriz, observamos que está formada por cristales alargados de plagioclasa, de tonalidades verdosas. Todo ello nos lleva a pensar que se tratan de rocas volcánicas, posiblemente andesitas, que han sufrido un proceso de alteración.

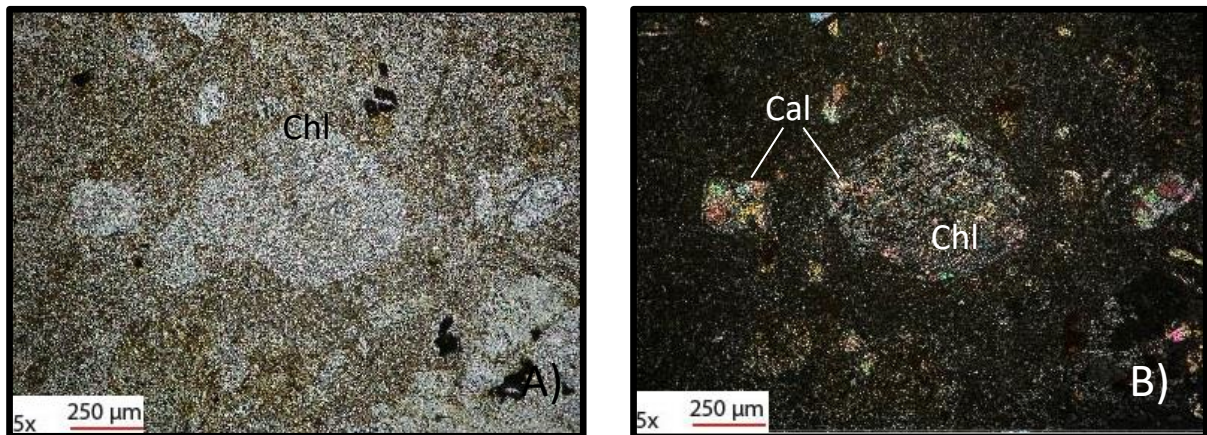


Figura 7: Imágenes de microscopio de luz transmitida de la muestra AC09124. A) Nícoles paralelos, B) nícoles cruzados. Cal= calcita, Chl= clorita.

El segundo grupo está formado por la muestra AC09127, en la cual observamos en visu textura hipocristalina porfídica, con cristales ocre dominantes, inequidimensionales, subidiomorfos, de hasta 0,5 cm. y tamaño medio 0,2 cm (Figura 6B). También hay abundantes cristales blanquecinos, de morfología similar a los anteriores pero con tamaño de hasta 0.3 cm y media 0.2 cm. Según el análisis de microscopía óptica, tiene textura porfídica, con fenocristales de plagioclasas principalmente, con características similares a las del grupo anterior pero, en este caso, el grado de cloritización es mayor (Figura 8), además encontramos gran cantidad de calcita.

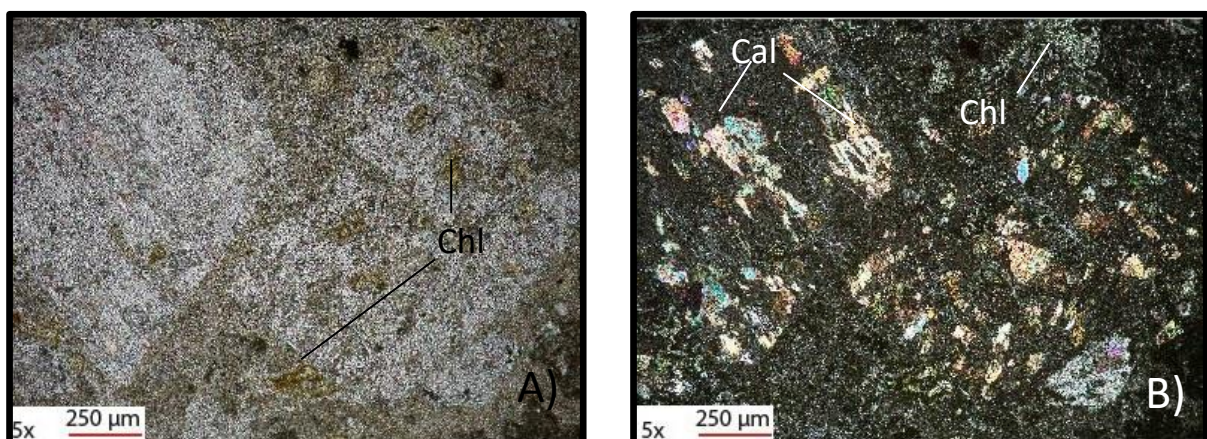


Figura 8: Imágenes de microscopio de luz transmitida de la muestra AC09127. a) Nícoles paralelos, b) nícoles cruzados. Cal= calcita, Chl= clorita.

También se aprecian apatito, moscovita y óxidos ferruginosos. Cabe destacar que en esta muestra se observa el inicio de un proceso de silicificación, que genera cristales de cuarzo monocristalino de tamaños muy variables (0,05 a 0,3 mm) en alguna plagioclasa. La



Alteración hidrotermal en yacimientos epitermales desarrollada en rocas básicas (Macizo del Deseado, Argentina).

matriz está formada principalmente por plagioclasas prismáticas de tonalidades verdosas. Esto lleva a pensar que se tratan de una roca volcánica, posiblemente andesita, que han sufrido un proceso alteración más intenso que las rocas del grupo anterior.

El tercer grupo está formado por la muestra AC09128, el estudio de visu muestra que es un agregado masivo de cristales de calcita esparítica, de color blanquecino con zonas grisáceas, que presenta efervescencia con HCl. En microscopía óptica se observa que está formada fundamentalmente por cristales de calcita esparítica (Figura 9), con tamaños muy variables ( $<0.5$  cm) con maclas tanto lamelares como simples, además muchos de los cristales presentan una buena exfoliación.

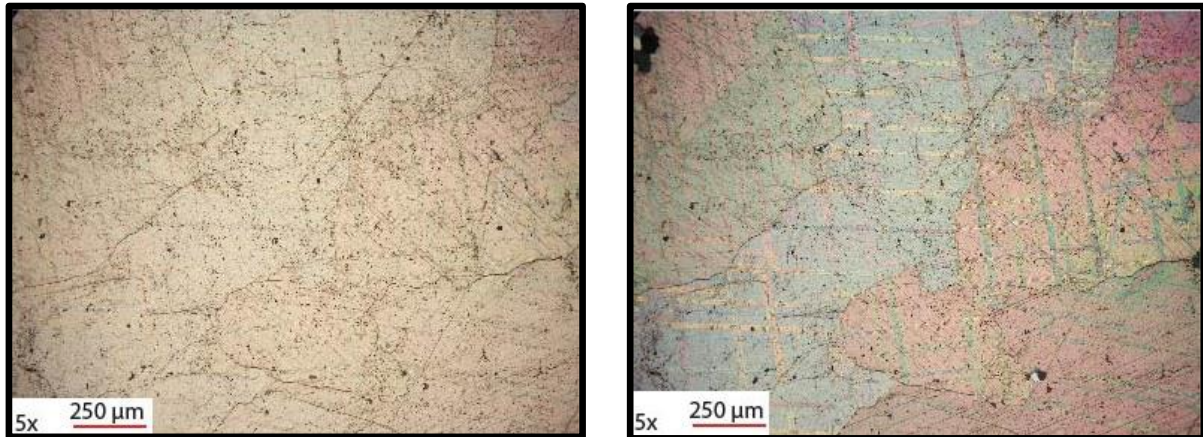


Figura 9: Imágenes de microscopio de luz transmitida de la muestra AC09138. a) Nícoles paralelos, b) nícoles cruzados.

El último grupo los forman las muestras AC09129 y AC09130, a partir del análisis de visu se observa que son muestras formadas por fundamentalmente cristales de cuarzo, de colores blanquecinos, que dan lugar a un entramado de cavidades poliédricas bien desarrolladas (Figura 10). Además tienen zonas brechoides con una matriz oquerosa anaranjada.



Figura 10: Muestras de mano, veta Josefa, muestra AC09130.

El estudio de microscopía óptica refleja que las muestras están formadas por dos generaciones de cuarzo, la primera generación de monocristales de gran tamaño, hasta de 1 centímetro, y otros de menor tamaño que rellenan cavidades o cristalizan en los bordes de los cristales anteriores, (Figura 11). La segunda generación está formada por cuarzo

Alteración hidrotermal en yacimientos epitermales desarrollada en rocas básicas (Macizo del Deseado, Argentina).

microcristalino que forma un mosaico xenotópico; además, en la matriz encontramos unos minerales amarillentos anaranjados que podrían ser arcillas de tipo clorita o similar. Todo esto lleva a pensar que se trata de rocas que han sufrido un proceso de silicificación intenso que ha borrado las características texturales y mineralógicas de las rocas volcánicas previas.

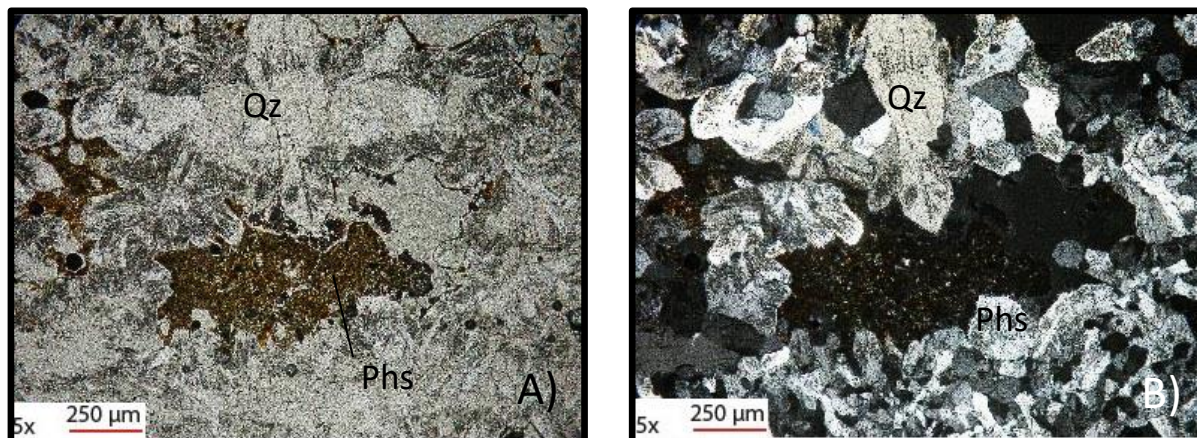


Figura 11: Imágenes de microscopio de luz transmitida de la muestra AC09130. a) Nícoles paralelos, b) nícoles cruzados. Qz= cuarzo, Phs= filosilicatos.

## 5.2. Resultados difracción de rayos - X (DRX)

Los resultados de DRX (tabla 2) de las rocas indican que están formadas principalmente por cuarzo, plagioclasa y filosilicatos, a excepción de la muestra AC09126, que presenta feldespato potásico y no presenta plagioclasa, sin embargo las muestras AC09124, AC09125 y AC09127 presentan además de lo anterior, calcita en bajas proporciones. La composición mineral de cada muestra se presenta en la tabla 2.

| Muestra | Cuarzo | Plagioclasa | Calcita | Filosilicatos | Fto. Potásico |
|---------|--------|-------------|---------|---------------|---------------|
| AC09121 | 43     | 26          | -       | 31            | -             |
| AC09124 | 52     | 24          | <5      | 21            | -             |
| AC09125 | 44     | 18          | 8       | 30            | -             |
| AC09126 | 66     | -           | -       | 24            | 10            |
| AC09127 | 44     | 31          | <5      | 23            | -             |

Tabla 2. Mineralogía de las muestras analizadas por DRX, en porcentaje en peso.

Los difractogramas de las agregados orientados (fracción < 20µm) indican que las arcillas presentes son clorita e illita fundamentalmente y menores proporciones de esmectita, aunque no todas las muestras presentan estos tres minerales. Además se han detectado reflexiones de baja intensidad correspondientes a interestratificados illita/esmectita (I/S). Los resultados se muestran en la tabla 3.

| Muestra | Illita | Clorita | Esmectita | I/S |
|---------|--------|---------|-----------|-----|
| AC09121 | 0      | 90      | 10        | ind |
| AC09124 | 51     | 48      | 1         | ind |
| AC09125 | 20     | 72      | 8         | ind |
| AC09126 | 92     | 4       | 4         | ind |
| AC09127 | 26     | 74      | 0         | ind |

Tabla 3. Mineralogía de arcillas de las (% peso) de las fracciones <20µm. Ind= indicios.

De las tablas anteriores y teniendo en cuenta la situación de cada muestra se deduce que cuanto más al sur se sitúan las muestras (AC09126), mayor es el contenido en cuarzo y

Alteración hidrotermal en yacimientos epitermales desarrollada en rocas básicas (Macizo del Deseado, Argentina).

menor en plagioclasa, debido a la alteración. En relación a los filosilicatos, se aprecia que el contenido total de los mismos permanece relativamente constante en todas las muestras analizadas con una variación máxima del 8%.

En referencia a los difractogramas correspondientes a la fracción menor a 20 $\mu$ m se observa que en todas las muestras hay una reflexión aproximadamente a 7.1Å, tanto en las muestras secadas al aire como en las de etilenglicol. Este pico es característico de las cloritas y caolinitas, pero el resto de reflexiones coinciden con las de la clorita y no con el de la caolinita. En la muestra AC09121 el pico de la clorita es el de mayor intensidad, esto queda reflejado en los porcentajes de la tabla 3.

Además se ha detectado, excepto en la muestra AC09121, una reflexión de intensidad considerable a 9.9Å, característico de las illitas. En la muestra AC09126, el pico de mayor intensidad de los filosilicatos es el de la illita. Otro pico que se ha detectado en la mayoría de los casos es el de 14-15Å en el caso de las muestras secadas al aire, que pasa a 16-19Å en las muestras solvatadas con etilenglicol, lo que indica que se trata de filosilicatos expandibles, en concreto, esmectitas, pero son picos de baja intensidad tal y como muestran los porcentajes en peso.

En general, los difractogramas de la fracción <20 $\mu$ m presentan un fondo considerable, lo que implica que las fases presentes en estas muestras (filosilicatos) son poco cristalinas.

Por último, se han detectado picos en torno a 10-10.3Å, en las muestras AC09121, AC09124 y AC09126. Esas reflexiones podrían ser debidas a interestratificados I/S o a paligorskita. Al analizar los difractogramas de las muestras secadas al aire y con etilenglicol, se observa una ligera expansión de los picos desplazándose del orden de 0.5 a 1Å, especialmente en la muestra AC09126, por lo que seguramente se trate de interestratificados I/S.



### 5.3. FESEM

Las imágenes de electrones retrodispersados tomadas en el FESEM muestran que los fenocristales están reemplazados por cloritas y calcita, mientras que la matriz que, seguramente originalmente fuera vítrea, esta reemplazada por interestratificados I/S, ilitas y moscovitas. Se observa, además, caolinita rellenando fracturas y grietas lo que indica que sería una fase posterior.

Los minerales analizados mediante esta técnica pertenecen al grupo de los silicatos, en concreto: filosilicatos, tectosilicatos, inosilicatos y nesosilicatos.

Las fórmulas de los minerales analizados calculadas a partir de los análisis puntuales (EDS) se presentan en las en las tablas 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 y 11.

#### 5.3.1. Plagioclasa

Las plagioclasas sin alterar (Tabla 4) presentan composiciones intermedias sódico-cálcicas. Dos análisis corresponden a albita.

| Muestra | AC09121 | AC09121 | AC09121 | AC09127 |
|---------|---------|---------|---------|---------|
| Mineral | Plg1    | Plg2    | Plg3    | Plg4    |
| Si      | 3.02    | 3.52    | 2.60    | 3.05    |
| Al      | 0.99    | 1.81    | 1.37    | 0.97    |
| Mg      | -       | -       | -       | -       |
| Fe      | -       | 0.04    | 0.03    | -       |
| Ca      | -       | 0.51    | -       | -       |
| Na      | 0.96    | 0.47    | 0.43    | 0.91    |
| K       | -       | 0.06    | 0.48    | -       |
| Ab      | 100     | 46      | 53      | 100     |
| An      | -       | 49      | 47      | -       |
| Or      | -       | 5       | -       | -       |

Tabla 4: Fórmula química de las plagioclasas (grupo de los tectosilicatos) analizadas por EDS. Se han determinado en base a 16 cargas negativas. La fórmula química general es  $(\text{Na,Ca})(\text{Si,Al})_3\text{O}_8$ . Ab= albita, An= anortita y Or= ortosa, expresado en porcentaje.

La presencia de albita indicaría un proceso de albitización de las plagioclasas durante el proceso hidrotermal (Figura12).

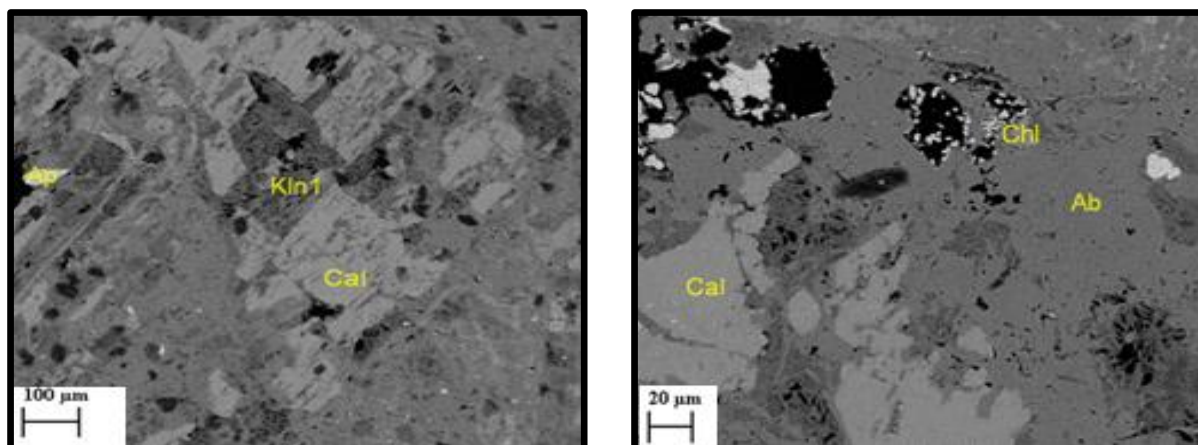


Figura 12: Imágenes de SEM (BSE) de una plagioclasa alterada a Calcita y Clorita de la muestra AC09127. Cal= calcita, Chl= clorita, Kln= caolinita, Ab= albita y Ap= apatito.

### 5.3.2. Piroxeno

Solo ha sido posible analizar piroxenos en la muestra AC09124 (Figura 13), en el resto de muestras estaban muy alterados por el proceso hidrotermal.

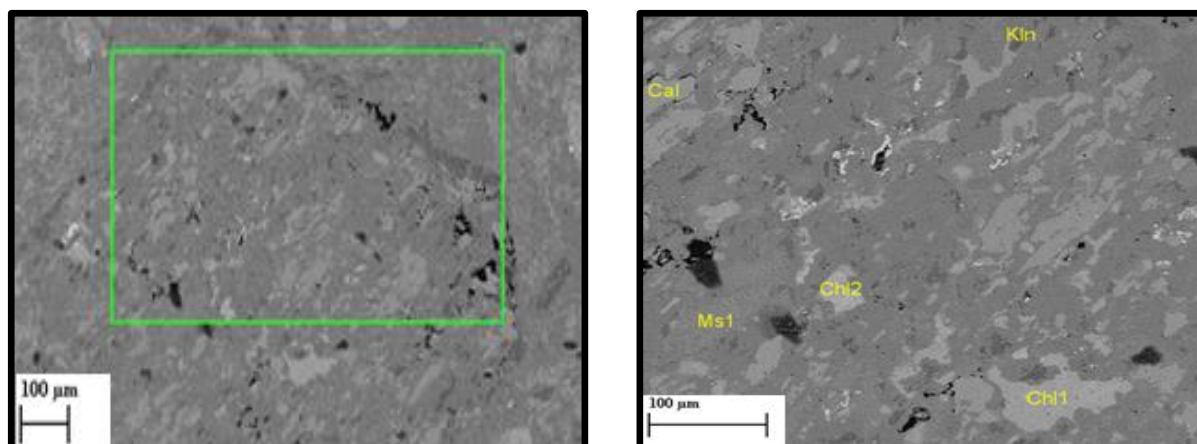


Figura 13: Imágenes de SEM (BSE) de un piroxeno alterado a Calcita y Clorita de la muestra AC09124, la imagen de la derecha se corresponde con el recuadro verde indicado en la imagen izquierda. Cal= calcita, Chl= clorita, Kln= caolinita, Ab= albita y Ms= moscovita

Las composiciones obtenidas (Tabla 5) indican que se trata de augitas.

| Muestra        | AC09124 | AC09124 | AC09124 |
|----------------|---------|---------|---------|
| Mineral        | Px1     | Px2     | Px3     |
| Si             | 1.92    | 1.92    | 1.79    |
| Al             | 0.08    | 0.07    | 0.20    |
| Mg             | 0.78    | 0.78    | 0.71    |
| Fe             | 0.33    | 0.33    | 0.35    |
| Ca             | 0.66    | 0.70    | 0.69    |
| Ti             | 0.02    | 0.03    | 0.09    |
| Na             | 0.03    | 0.02    | 0.04    |
| Mn             | 0.02    | -       | -       |
| $\Sigma_{oct}$ | 1.24    | 1.22    | 1.35    |

Tabla 5: Fórmula química de las piroxenos (grupo de los inosilicatos) analizadas por EDS. Se han determinado en base a 12 cargas negativas. La fórmula química general es  $(Ca,Mg,Fe,Mn,Na,Li)(Al,Mg,Fe,Mn,Cr,Sc,Ti)(Si,Al)_2O_6$ .  $\Sigma_{oct}$ = suma de cationes octaédricos.

### 5.3.3. Clorita

Las cloritas reemplazan a los fenocristales de plagioclasas (Figura 12) y de piroxenos (Figura 13). El grado de reemplazamiento es variable. Los análisis químicos de las cloritas (Tabla 6) reflejan contenidos en Si más altos de lo esperable, y contienen además Na, Ca o K que son elementos que no entran en la estructura de las mismas. Esto indica que los análisis proceden de la mezcla de cloritas con las fases precursoras, en este caso feldespatos, otra explicación posible a estas anomalías composicionales sería que las cloritas contengan interestratificados con fases tipo esmectita, pero los datos de DRX no avalan esta hipótesis, lo que implica que posiblemente los análisis estén contaminados por los feldespatos. Esta posible contaminación en los análisis hace que la suma de cationes octaédricos no sume 6, sino que da valores más bajos. A pesar de esto, se puede afirmar que son cloritas trioctaédricas y ferrosas. Por último destacar que las cloritas se forman en todos los casos a partir de los fenocristales y en ningún caso aparecen en la matriz de las muestras.

Alteración hidrotermal en yacimientos epitermales desarrollada en rocas básicas (Macizo del Deseado, Argentina).

| Muestra | AC09121 | AC09121 | AC09121 | AC09124 | AC09124 | AC09124 | AC09124 |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|         | Chl1    | Chl2    | Chl3    | Chl4    | Chl5    | Chl6    | Chl7    |
| Si      | 3.17    | 3.08    | 3.07    | 3.22    | 3.60    | 3.08    | 3.14    |
| AlIV    | 0.83    | 0.92    | 0.93    | 0.78    | 0.40    | 0.92    | 0.86    |
| AlVI    | 1.49    | 1.32    | 1.32    | 1.44    | 1.92    | 1.54    | 1.59    |
| Mg      | 1.85    | 2.00    | 1.99    | 1.59    | 1.12    | 1.83    | 1.57    |
| Fe      | 2.18    | 2.48    | 2.38    | 2.51    | 1.97    | 2.20    | 2.32    |
| Ca      | 0.04    | -       | -       | 0.05    | 0.03    | 0.05    | 0.07    |
| Mn      | 0.06    | -       | 0.06    | 0.02    | 0.01    | 0.03    | 0.02    |
| Na      | -       | -       | -       | 0.03    | 0.20    | 0.01    | 0.04    |
| K       | -       | -       | -       | 0.04    | 0.15    | 0.02    | 0.05    |
| Σoct    | 5.52    | 5.80    | 5.74    | 5.57    | 5.02    | 5.60    | 5.49    |
| F/FM    | 0.54    | 0.55    | 0.54    | 0.61    | 0.64    | 0.55    | 0.60    |
| Muestra | AC09124 | AC09127 | AC09127 | AC09127 | AC09127 | AC09127 | AC09127 |
|         | Chl8    | Chl9    | Chl10   | Chl11   | Chl12   | Chl13   | Chl14   |
| Si      | 3.38    | 3.38    | 2.83    | 3.59    | 3.60    | 3.28    | 3.45    |
| AlIV    | 0.62    | 0.62    | 1.17    | 0.41    | 0.40    | 0.72    | 0.55    |
| AlVI    | 1.63    | 1.77    | 1.10    | 1.79    | 1.90    | 1.91    | 2.13    |
| Mg      | 1.47    | 1.62    | 1.42    | 1.42    | 1.33    | 1.41    | 1.22    |
| Fe      | 2.16    | 1.94    | 3.42    | 1.93    | 1.86    | 2.02    | 1.67    |
| Ca      | 0.09    | 0.06    | 0.10    | 0.05    | 0.06    | 0.08    | 0.04    |
| Mn      | 0.04    | -       | -       | -       | -       | -       | -       |
| Na      | 0.01    | -       | -       | 0.17    | 0.13    | -       | -       |
| K       | 0.11    | 0.07    | -       | 0.10    | 0.07    | -       | 0.29    |
| Σoct    | 5.30    | 5.33    | 5.94    | 5.13    | 5.09    | 5.33    | 5.02    |
| F/FM    | 0.59    | 0.54    | 0.71    | 0.58    | 0.58    | 0.59    | 0.58    |

Tabla 6: Fórmulas de las cloritas (grupo de los filosilicatos) analizadas por EDS. Se han determinado en base a 28 cargas negativas. La fórmula química general es:

(Mg,Fe)<sub>3</sub>(Si,Al)<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>(Mg,Fe)<sub>3</sub>(OH)<sub>6</sub>. Σoct= suma de cationes octaédricos, F/FM=Fe/Fe+Mg,

#### 5.3.4. Titanita

Los análisis químicos (Tabla 7) indican que se trata de silicatos de Ca y Ti, es decir titanitas. Lo más destacable de los análisis composicionales de estos óxidos es la presencia de Al y Fe, y el bajo contenido en Si, lo que nos da una idea de una posible sustitución parcial del Si por Al en la estructura. Es destacable que posiblemente las titanitas estuvieran en la roca original (Figura 14A), ya que algunos minerales generados durante la alteración contienen proporciones (bajas) de Ti que podría haber sido incorporado durante este proceso.

| Muestra | AC09121 | AC09121 | AC09121 |
|---------|---------|---------|---------|
| Mineral | Tit1    | Tit2    | Tit3    |
| Si      | 1.10    | 1.08    | 1.13    |
| Al      | 0.14    | 0.14    | 0.28    |
| Mg      | -       | 0.02    | -       |
| Fe      | 0.05    | 0.05    | 0.04    |
| Ca      | 0.96    | 0.94    | 0.93    |
| Ti      | 0.78    | 0.81    | 0.66    |
| Σoct    | 0.97    | 1.01    | 1.63    |

Tabla 7: Fórmula química de titanitas (grupo de los nesosilicatos) analizadas por EDS. Se han determinado en base a 10 cargas negativas. La fórmula química general es CaTiSiO<sub>5</sub>.

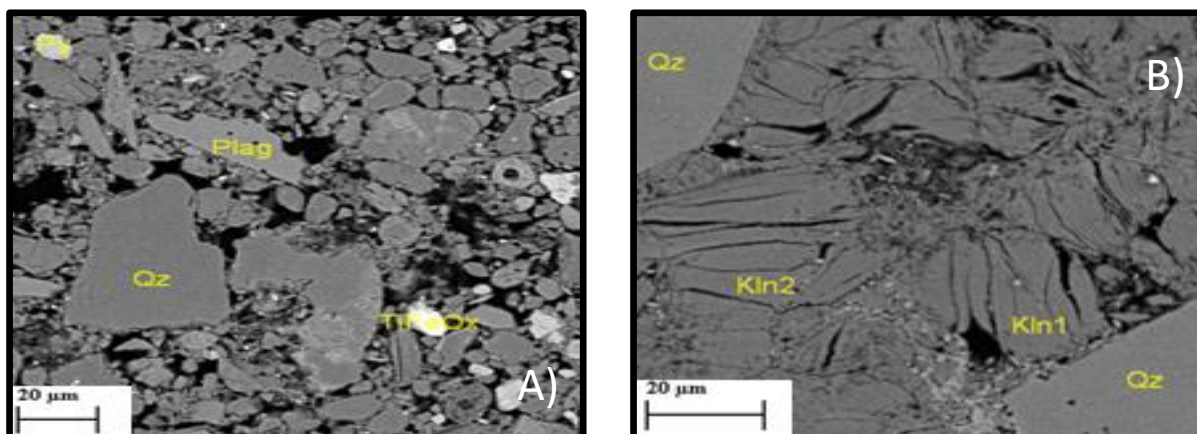


Figura 14: Imágenes de SEM (BSE) de cuarzos y filosilicatos hidrotermal de la muestra AC09130. Qz= cuarzo, Kln= caolinita, Plg= plagioclasa, TiFeOx= óxidos de titanio y hierro.

### 5.3.5. Caolinita

Las caolinitas analizadas (Tabla 8) muestran contenidos en silicio y aluminio similares a los de una caolinita teórica, pero destaca el contenido de otros elementos como Mg, Fe y K en todos los análisis. Lo que indica que los análisis corresponden a caolinitas mezcladas con otras fases. Esto es debido a que el tamaño de las fases analizadas es menor que el del haz de electrones utilizado para el análisis. Por último destacar que las caolinitas se forman en las grietas o fracturas de los fenocristales (Figura 14B), por lo que es el último mineral de la alteración en aparecer.

| Muestra        | AC09124 | AC09124 | AC09127 | AC09127 | AC09130 | AC09130 |
|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Mineral        | Kln1    | Kln2    | Kln3    | Kln4    | Kln5    | Kln6    |
| Si             | 1.90    | 1.98    | 1.88    | 1.99    | 2.05    | 2.07    |
| Al             | 2.02    | 1.91    | 2.05    | 1.92    | 1.85    | 1.86    |
| Na             | -       | 0.01    | -       | -       | -       | -       |
| Mg             | 0.07    | 0.07    | 0.10    | 0.06    | 0.03    | 0.03    |
| Fe             | 0.05    | 0.04    | 0.03    | 0.03    | 0.05    | 0.02    |
| $\Sigma_{oct}$ | 2.14    | 2.02    | 2.18    | 2.02    | 1.93    | 1.91    |
| K              | 0.01    | 0.03    | 0.04    | 0.03    | 0.02    | 0.03    |
| Ca             | 0.02    | 0.02    | -       | -       | -       | -       |

Tabla 8: Fórmula química de las caolinitas (grupo de los filosilicatos) analizadas por EDS. Se han determinado en base a 14 cargas negativas. La fórmula química general es  $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ .

### 5.3.6. Interestratificados I/S

Una illita teórica presenta aproximadamente 0.70 átomos de K por formula unidad (apfu). Las fases analizadas presentan contenidos en K que varían desde 0.17-0.51 apfu.

Los análisis químicos de la tabla 9 reflejan que se trata de arcillas dioctédricas y aluminicas con cargas interlaminares bajas, debidas fundamentalmente a la presencia de K en la interlámina. Estos análisis presentan una amplia variabilidad, lo que sugiere que se trataría de interestratificados I/S con proporciones variables de illita y esmectita o incluso que estuvieran mezclados con esmectita, fase que había sido detectada en proporciones muy bajas por DRX.

También es destacable que los interestratificados no aparezcan directamente sobre los fenocristales si no que están en la matriz, posiblemente reemplazando el material original. Además, aparecen también en fracturas, vetas o huecos, por lo que es muy posible

Alteración hidrotermal en yacimientos epitermales desarrollada en rocas básicas (Macizo del Deseado, Argentina).

que la formación de estos interestratificados, se produzca en diversas etapas de la alteración.

| Muestra      | AC09121 | AC09121 | AC09121 | AC09121 | AC09127 | AC09130 | AC09130 | AC09130 |
|--------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|              | I/S     | I/S     | I/S     | I/S     | I/S     | I/S     | I/S     | I/S     |
| Si           | 3.88    | 3.73    | 3.84    | 3.90    | 3.68    | 3.56    | 3.17    | 3.60    |
| AlIV         | 0.12    | 0.27    | 0.16    | 0.10    | 0.32    | 0.44    | 0.83    | 0.40    |
| AlVI         | 1.53    | 1.58    | 1.54    | 1.61    | 1.80    | 1.55    | 1.91    | 1.52    |
| Mg           | 0.24    | 0.22    | 0.22    | 0.30    | 0.06    | 0.25    | 0.06    | 0.26    |
| Fe           | 0.17    | 0.19    | 0.13    | 0.09    | 0.10    | 0.26    | 0.27    | 0.28    |
| Ti           | -       | -       | 0.02    | -       | -       | -       | -       | -       |
| $\Sigma$ oct | 1.95    | 2.00    | 1.92    | 2.03    | 1.95    | 2.06    | 2.24    | 2.05    |
| Ca           | 0.06    | -       | 0.09    | 0.16    | -       | 0.10    | 0.07    | 0.12    |
| Na           | -       | -       | -       | 0.03    | 0.35    | -       | -       | -       |
| K            | 0.39    | 0.51    | 0.43    | 0.07    | 0.16    | 0.31    | 0.02    | 0.26    |
| Carg. Int    | 0.52    | 0.51    | 0.60    | 0.42    | 0.52    | 0.51    | 0.17    | 0.49    |

Tabla 9: Fórmula química de los interestratificados I/S (grupo de los filosilicatos) analizadas por EDS. Se han determinado en base a 22 cargas negativas.  $\Sigma$ oct= suma de cationes octaédricos. Carg. Int.= Carga interlaminar.

### 5.3.7. Illita

Los análisis de la tabla 10 muestran que se trata de filosilicatos dioctaédricos aluminicos potásicos. La carga interlaminar se debe fundamentalmente a la presencia de K en posiciones interlaminares. Los valores de carga interlaminar varían entre 0.65-0.77 apfu indicando que se trata de illitas. La composición química, y el Al<sup>IV</sup> y Al<sup>VI</sup>., son los esperables en illitas.

| Muestra      | AC09124 | AC09124 | AC09124 | AC09124 | AC09124 | AC09127 | AC09127 |
|--------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Mineral      | II      | II      | II      | II      | II      | II      | II      |
| Si           | 3.39    | 3.49    | 3.43    | 3.36    | 3.39    | 3.41    | 3.44    |
| AlIV         | 0.61    | 0.51    | 0.57    | 0.64    | 0.61    | 0.59    | 0.56    |
| AlVI         | 1.55    | 1.69    | 1.79    | 1.76    | 1.82    | 1.83    | 1.77    |
| Mg           | 0.16    | 0.16    | 0.10    | 0.11    | 0.11    | 0.11    | 0.14    |
| Ti           | 0.01    | 0.01    | 0.01    | 0.01    | -       | -       | -       |
| Mn           | -       | 0.01    | -       | 0.01    | -       | -       | -       |
| Fe           | 0.30    | 0.12    | 0.07    | 0.09    | 0.07    | 0.06    | 0.11    |
| $\Sigma$ oct | 2.01    | 1.99    | 1.97    | 1.99    | 2.00    | 2.01    | 2.02    |
| K            | 0.64    | 0.60    | 0.67    | 0.71    | 0.67    | 0.60    | 0.65    |
| Ca           | 0.03    | 0.04    | 0.02    | 0.02    | 0.02    | -       | -       |
| Na           | 0.02    | 0.02    | 0.02    | 0.02    | 0.02    | 0.08    | -       |
| Car.Int      | 0.71    | 0.70    | 0.73    | 0.77    | 0.73    | 0.68    | 0.65    |

Tabla 10: Fórmula química de las illitas (grupo de los filosilicatos) analizadas por EDS. Se han determinado en base a 22 cargas negativas. La fórmula química general es (K,H<sub>3</sub>O)(Al, Mg, Fe)<sub>2</sub>(Si, Al)<sub>4</sub>O<sub>10</sub>[(OH)<sub>2</sub>, (H<sub>2</sub>O)].  $\Sigma$ oct= suma de cationes octaédricos. Carg. Int.= Carga interlaminar

## 6. Discusión

Con los estudios de microscopía óptica y FESEM se ha determinado que la roca de caja de la Veta Josefa es una roca volcánica de composición andesítica, con textura porfídica y formada fundamentalmente por fenocristales de plagioclasa, piroxeno, y de modo ocasional cuarzo, en orden de abundancia respectivamente. La matriz originalmente debió ser vítrea, pero ha sido imposible determinarlo con certeza ya que debido al proceso de alteración no se ha encontrado evidencias de la matriz original.

Durante el proceso de alteración se produce la disolución de los componentes originales de la roca y la matriz, y cristalizan nuevas fases tales como filosilicatos, calcita y cuarzo. La formación de una fase hidrotermal u otra depende, principalmente, de las condiciones físico-químicas y temperatura del fluido.

Los datos mineralógicos muestran que en las zonas más alejadas de la veta predominan como fases hidrotermales las arcillas y calcita, mientras que en las zonas más próximas a la veta, predomina el cuarzo. Hay ciertas heterogeneidades en la distribución de estas zonas de alteración que podrían estar relacionadas con la eficiencia de los procesos de alteración hidrotermal, que a su vez, son consecuencia de la relación fluido/roca. Si esta relación fue baja pudo provocar diferencias en los tipos de alteración incluso a escala de muestra.

Los datos muestran cuatro zonas de alteración que se describen a continuación desde la veta hacia zonas distales.

En la zona más próxima a la veta (muestras AC09129 y AC09130) se observan procesos de silicificación. La roca original ha sido disuelta y se produce la cristalización de cuarzo borrando cualquier evidencia de la mineralogía y textura inicial. Sin embargo, se puede identificar puntualmente, plagioclasa, interestratificados I/S y caolinita. La presencia de ésta última sugiere que la temperatura fue inferior a 250-300°C (Pirajno, 1992).

A unos 20 metros de las muestras anteriores, se sitúa la muestra AC09128, la cual presenta un proceso de carbonatación, lo que implicaría cambios significativos en las condiciones físico-químicas del fluido hidrotermal respecto al de la zona anterior. Sobre esta zona volveremos más adelante.

La tercera zona de alteración, correspondiente a la muestra AC09127, presenta características intermedias entre los procesos de alteración descritos en la zona proximal y los de la parte más distal, que se describirán más adelante. En esta zona, la alteración tiene características propias de argilitización avanzada. Los fenocristales han sido reemplazados por clorita junto con otras fases micáceas y posteriormente por calcita. La matriz original también ha sido disuelta y ha cristalizado en ella, primero illita y moscovita, a continuación interestratificados I/S y por último caolinita. Además de esto algunas de las fracturas están rellenas de cuarzo, lo que indicaría una fase tardía de silicificación.

Por último, en la zona más distal (muestras AC09121, AC09124, AC09125, AC09126), las rocas originales también han sufrido procesos de argilitización, si bien la cantidad de caolinita es menor. Los fenocristales de plagioclasa sufrieron un proceso inicial de albitización, posteriormente, junto con los piroxenos han sido reemplazados total y parcialmente por clorita y otras fases micáceas (illita y moscovita). Por último, la parte central de estos fenocristales fue reemplazada por calcita, si bien en proporciones más bajas que en la zona anterior. El resto de minerales accesorios de la roca original no han sufrido

Alteración hidrotermal en yacimientos epitermales desarrollada en rocas básicas (Macizo del Deseado, Argentina).

procesos de alteración, salvo las titanitas, las cuales han sido reemplazadas parcialmente por calcita. Por su parte, la matriz de estas rocas fue disuelta y reemplazada por, illita y moscovita, interestratificados I/S, esmectita y caolinita, en orden de aparición. En resumen, esta zona se diferenciaría de la anterior por tener menores contenidos en calcita y caolinita y no presentar procesos de silicificación.

Las diferencias texturales y mineralógicas entre estas cuatro zonas reflejan la evolución del fluido y de sus características físico-químicas, la parte proximal está silicificada, donde el fluido debió tener un pH ácido y una temperatura del orden de los 250°C (Pirajno, 1992), mientras que en las partes distales, para la cristalización de clorita, illita, I/S, caolinita se necesitan unas condiciones de pH cercanas a la neutralidad y una temperatura ligeramente inferior, del orden de 200-250°C. En las zonas intermedias las condiciones estarían entre esos valores de pH y temperatura.

La muestra AC09128, formada fundamentalmente por calcita, presenta unas características totalmente diferentes a las anteriores, que implican que el fluido tenía unas condiciones físico-químicas distintas, ya que tendría que tener mayor proporción de CO<sub>2</sub>. Las relaciones texturales sugieren que la carbonatación sea un proceso independiente de los descritos anteriormente, posiblemente debido a un fluido hidrotermal distinto, tratándose de un proceso de alteración tardío, superpuesto a los anteriores y del que no se conocen más datos debido a que solo se dispone de una muestra.

El hecho de que se haya observado caolinita rellenando fracturas sugiere que la baja disponibilidad de fluido en el sistema no generó disoluciones efectivas, sino que circulo por zonas de fisibilidad, donde precipito. Que se solapen distintas zonas de alteración, puede ser debido a la baja eficiencia del proceso de alteración, provocada, a su vez, por una baja relación roca/fluido que favoreció la formación de diferentes filosilicatos bajo condiciones de no equilibrio.

Por tanto, el estudio muestra que el conjunto de características observadas en la alteración de la roca de caja de la veta Josefa, implican silicificación y argilitización como los principales procesos de alteración hidrotermales. Diferenciando una zona de alteración proximal, silicificada, y otra, más distal, que evoluciona de argílica avanzada a argílica en función de la mayor distancia a la veta. Sobre esta disposición espacial y mineralógica, se dispone una carbonatación claramente posterior.

Las características que presentan las alteraciones estudiadas son propias de depósitos hidrotermales de baja a intermedia sulfidación (Camprubí *et al*, 2003). Hay que tener en cuenta que en este tipo de depósito epitermales, la mineralización se encuentra en las partes distales y menos alteradas, por lo que las zonas potencialmente favorables en nuestra área de estudio serían las que presentaran alteración argílica.

## 7. Conclusions

The hydrothermal fluids responsible for the formation of the Josefa vein (Martha Este vein system at Macizo del Deseado) also originate some hydrothermal alteration zones. The proximal one, close to the vein, is marked by silicification, whereas, the distal ones, are marked by the transition from advanced argillic to argillic alteration types. Also, a late carbonatization is also present.

The mineral assemblages of each alteration types allow us to infer that hydrothermal fluids evolved from acid at 250-300°C condition in the proximal zone to neutral at 200-250°C in the distal zones.

The mentioned alteration types are characteristic of low to intermediate sulfidation epithermal deposits being the Ag-(Au) richer areas those marked by argillitic to sericitic alteration. So, we propose in our case study focus on argillitic zones to explore potentially economic zones.

## Agradecimientos

La realización de este trabajo ha sido posible gracias a la colaboración, consejos y gran disposición de mi tutora y codirector de trabajo de fin de grado Blanca Bauluz y Natxo Subías (Universidad de Zaragoza), además de su constante supervisión a la hora de realizar los trabajos de laboratorio y redacción. También agradecer al Dr. Remigio Ruiz (Universidad de La Plata; Argentina) su colaboración a la hora de obtener documentos y bibliografía a cerca de la zona de estudio.

Además, deseo agradecer al Servicio de Apoyo a la Investigación de la Universidad de Zaragoza por permitir el uso del Servicio de Difracción de Rayos X y Servicio de Microscopía Electrónica de Materiales.

## Bibliografía

Archangelsky, S., Cuneo, R. (1984): Zonación del Pérmico continental Argentino sobre la base de sus plantas fósiles. En: *Memorias del 3º Congreso Latinoamericano de Paleontología*: 143-153.

Biscaye, P.E. (1965): *Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the Atlantic ocean and adjacent seas and ocean*. Geol. Soc. Am. Bulletin, 76,803-832.

Camprubí, A., González-Partida, E., Levresse, G., Tritlla, J., Carrillo-Chávez, A. (2003): Depósitos epitermales de alta y baja sulfuración: una tabla comparativa. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. Tomo LVI, Nº 1: 10-18.

De Barrio, R. E., Panza, J. L., Nullo, F.E. (1999): *Jurásico y Cretácico del Macizo del Deseado, provincia de Santa Cruz*. En: *Geología Argentina* (ed. R. Caminos). Servicio Geológico Minero Argentino del Instituto de Geología y Recursos Minerales (SEGEMAR), Buenos Aires, Anales 29: 511-527p.

Di Persia, C. (1958): *Informe previo al levantamiento geológico en escala 1:100000 de la zona norte de la provincia de Santa Cruz, al Sur del Río Deseado*. Quinta Campaña. Yacimientos petrolíferos Fiscales, Buenos Aires. Informe Inédito.



Alteración hidrotermal en yacimientos epitermales desarrollada en rocas básicas (Macizo del Deseado, Argentina).

Fernández, R., Blesa, A., Moreira, P., Echeveste, H., Mykietiuik, K., Andrada de Palomera, P., Tessone, M. (2008): Los depósitos de oro y plata vinculados al magmatismo jurásico de la Patagonia: revisión y perspectivas para la exploración. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 63 (4): 65-681p.

Feruglio, E. (1949): *Descripción geológica de la Patagonia*. Tomo 3, Dirección Nacional de Yacimientos Petrolíferos Fiscales, Buenos Aires.

Genini, A. D. (1997): Informe preliminar Mosaico 4969-II-B3, Proyecto 19NE, Área Cerro Vanguardia, Provincia de Santa Cruz. Plan Patagonia-Comahue, *Secretaría de Minería*, inédito.

González Guillot, M., Biel, C., Fanlo, I., Subias, I., Mateo González, E. (2008): *Cobres grises y sulfosales de la plata del yacimiento Epitermal de Mina Martha, Macizo del Deseado*, Santa Cruz (Argentina). *Macla*, 9, 127-128.

González Guillot, M., de Barrio, R., Ganem, F. (2004): Mina Martha: un yacimientos epitermal argentífero en el Macizo del Deseado, provincia de Santa Cruz. En: *7º Congreso de Mineralogía y Metalogenia*, 199-204

Guido, D. M. (2004): Subdivisión litofacial e interpretación del volcanismo jurásico (Grupo Bahía Laura) en el este del Macizo del Deseado, provincia de Santa Cruz. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 59 (4): 727-742.

Guido, D. M., De Barrio, R.E. (2004): Laguna Dulce: Nuevo afloramiento del complejo Río Deseado, Macizo del Deseado, provincia de Santa Cruz. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 59 (2): 360-363.

Guido, D. M., Escayola, M. P., Schalamuk, I. B. (2004): The basement of the Deseado Massif at Bahía Laura, Patagonia, Argentina; a proposal for its evolution. *Journal of South American Earth Sciences* 16(2004) 567-578.

Guido, D., Escayola, M., De Barrio, R., Schalamuk, I., Fnz, G. (2006): La Formación Bajo Pobre (Jurásico) en el este del Macizo del Deseado, Patagonia: vinculación con el Grupo Bahía Laura. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 61 (2): 187-196p.

Guido, D., Schalamuk, I. (2003): *Genesis and exploration potential of epithermal deposits from the Deseado Massif, Argentinean Patagonia*. En: Eliopoulos et al. (ed.). *Mineral Exploration and Sustainable Development*. Balkema-Rotterdam, Vol I, 493-496.

Hedenquist, J. W., Izawa, E., Arribas, A., White, N. C. (1996): Epithermal gold deposits: Styles, characteristics, and exploration. Resource Geology Special Publication N°1. *Society of Resource Geology*: 18p, Tokio.

Homovc, J., Constantini, L. (2001): Hydrocarbon exploration potential within intraplate Shear-related depocentres: Deseado and San Julián Basins, southern Argentina. *American Association of Petroleum Geologists*, 85 (10): 1795- 1810.

Kay, S. M., Ramos, V. A., Mpodozis, C., Sruoga, P. (1989): Late Paleozoic to Jurassic silicic magmatism at the Gondwana margin: analogy to the Middle Proterozoic in North America?. *Geology*, 17 (4): 324-328.

Lesta, P. (1969): Algunas nuevas comprobaciones en la geología de la Patagonia. *Jornadas geológicas Argentinas*, Anales 4º 2: 187-194.

Alteración hidrotermal en yacimientos epitermales desarrollada en rocas básicas (Macizo del Deseado, Argentina).

Moreira, P., González, P.D., Fernández, R., Echeveste, H., Schalamuk, I., Etcheverry, R. (2005): El basamento metamórfico de muy bajo a bajo grado de las estancias La Modesta y La Josefina, macizo del Deseado, provincia de Santa Cruz. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 60 (1): 49-63p.

Páez, G. N. (2012): *Génesis del yacimiento de metales preciosos Mina Martha, Sector sudoccidental del Macizo del Deseado, Provincia de Santa Cruz*. Tesis doctoral, Univ. Nacional de La Plata, 241p.

Palma, M. (1989): Los eventos geológicos del Macizo del Deseado durante la evolución tectónica del Continente Austral. *Reunión sobre Geotranssectas de América del Sur*. 97-101.

Pankhurst, R., Sruoga, P., Rapela, C. (1993): Estudio Geocronológico Rb-Sr de los complejos Chon-Aike y El quemado a los 47°30' L.S. *XII Congreso Geológico Argentino y II congreso de Exploración de Hidrocarburos*. Actas IV: 171-178.

Pankhurst, R. J., Leat, P. T., Sruoga, P., Rapela, C. W., Marquez, M., Storey, B. C., Riley, T. R. (1998): The Chon Aike province of Patagonia and related rocks in West Antarctica; a silicic large igneous province. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 81: 113-136.

Panza, J. (2002): La cubierta detrítica del Cenozoico superior. En: M. Haller (ed.). *Geología y Recursos Naturales de Santa Cruz, XV Congreso Geológico Argentino*, Relatorio I-17: 259-284.

Ramos, V., Kay, S. (1992): Southern Patagonian plateau basalts and deformation: Backarc testimony of ridge collisions. *Tectonophysics*, 205: 261-282.

Ramos, V. A. (2008): Patagonia: a paleozoic continent adrift. *Journal of South American Earth Sciences*, 26 (3): 235-250.

Pirajno, F. (1992): *Hydrothermal mineral deposits. Principles and fundamental concepts for the exploration geologist*. Springer-Verlag, Berlin, pp. 709.

Remigio, R. (2012): *Geología y mineralizaciones del sector sudoccidental del Macizo del Deseado, Santa Cruz*. Tesis doctoral, Univ. Nacional de la Plata, 314p.

Ruiz, R., Páez, G., Guido, D., Schalamuk, I. (2008): Ambiente volcánico y mineralizaciones del área Cerro 1º de Abril, sector sudoccidental del Macizo del Deseado, Santa Cruz, Argentina. *Actas del XVII Congreso geológico Argentino*, 895-898, Jujuy.

Schalamuk, I. B., De Barrio R. E., Zubia, M. A., Genini, A. D., Echeveste, H. (1999): *Provincia auroargentífera del Deseado, Santa Cruz. En: Recursos minerales de la República Argentina* (ed. E. O. Zappettini). Servicio Geológico Minero Argentino del Instituto de Geología y Recursos Minerales (SEGEMAR), Buenos Aires, Anales 35: 1177-1188,

Schultz, L. G. (1964): *Quantitative interpretation of mineralogical composition from X-ray and chemical data for Pierre shale*. U.S. Geol. Prof. Paper, 391-c, 31.

Zambrano, J., Urien, C. (1970): Geological outline of the basins in Southern Argentina and their continuation on the Atlantic shore. *Journal of Geophysical Research*, 75 (8): 1363-1396.